

# Определение концентрации галлия в германии, трансмутационно легированном нейтронами, из измерений сопротивления в области прыжковой проводимости

© О.П. Ермолаев<sup>¶</sup>, Т.Ю. Микульчик

Белорусский государственный университет,  
220050 Минск, Белоруссия

(Получена 21 апреля 2003 г. Принята к печати 2 июня 2003 г.)

Рассматриваются способы определения концентрации галлия в германии, трансмутационно-легированном тепловыми и надкадмиевыми нейтронами, из измерений удельного сопротивления в области низких (гелиевых) температур. Для оценки концентрации галлия предлагается использовать концентрационные зависимости прыжкового сопротивления  $\rho_3$  и удельного сопротивления, измеренного при температуре 2.5 К.

## 1. Введение

Метод нейтронно-трансмутационного легирования полупроводников [1] привлекает внимание исследователей в связи с его преимуществами перед обычными металлургическими методами введения примесей. Преимуществами являются высокая точность легирования и высокая однородность распределения примесей. В результате нейтронно-трансмутационного легирования получается германий  $p$ -типа проводимости (основной примесью является галлий), причем степень компенсации ( $K$ ) определяется энергетическим спектром реакторных нейтронов и его жесткостью (например, [2]). Нейтронно-трансмутационно легированный германий служит удобным объектом для исследования фундаментальных проблем проводимости в примесной зоне и перехода диэлектрик–металл, а также является ведущим материалом для создания низкотемпературных термометров сопротивления и детекторов высокоэнергетических частиц.

В связи с этим важным является вопрос определения концентраций трансмутационно введенных примесей. Одним из традиционных методов определения концентраций примесей является исследование эффекта Холла. Однако вырождение валентной зоны германия  $p$ -типа проводимости, т. е. наличие зон легких и тяжелых дырок, зависимость холл-фактора от концентрации примеси и магнитного поля затрудняет определение концентрации галлия ( $N_A$ ). Вклад легких дырок в эффект Холла для сложной валентной зоны германия и его зависимость от уровня легирования исследовались в [3]. Экспериментальное определение коэффициента Холла представляет собой трудоемкую задачу. Оценить концентрацию галлия можно из анализа температурных зависимостей концентрации свободных носителей заряда. Одна из основных причин, ограничивающих применение этого метода, — взаимодействие примесей при их концентрации больше чем  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Более простым методом оценки концентрации основной примеси является анализ температурных зависимостей сопротивления в области

прыжковой проводимости. Как известно, при не слишком низких температурах в области прыжковой проводимости с постоянной энергией активации ( $\varepsilon_3$ ) удельное сопротивление имеет вид

$$\rho = \rho_3 \exp \frac{\varepsilon_3}{kT}, \quad (1)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $\rho_3$  — предэкспоненциальный множитель, который определяется [4]

$$\rho_3 \propto \exp \frac{\alpha(K)}{aN_A^{1/3}}, \quad (2)$$

где  $\alpha(K)$  — функция, зависящая от степени компенсации,  $a$  — боровский радиус примеси. Согласно (2), прыжковая проводимость очень чувствительна к изменению концентрации основной примеси. Энергия  $\varepsilon_3$  не зависит от температуры и имеет вид [4]

$$\varepsilon_3 = \left( \frac{e^2 N_A^{1/3}}{\chi} \right) F(K), \quad (3)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $\chi$  — диэлектрическая проницаемость,  $F(K)$  — некоторая универсальная функция степени компенсации.

В настоящей работе рассматриваются методы определения концентрации галлия в германии, трансмутационно легированном тепловыми и надкадмиевыми (быстрыми) нейтронами, из измерений сопротивления в области прыжковой проводимости.

## 2. Методика эксперимента

Нами исследовались образцы нелегированного германия с концентрацией электронов  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Образцы облучались различными флюенсами реакторных нейтронов, при этом поток быстрых нейтронов с энергией  $E \geq 0.1 \text{ МэВ}$  составлял  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} < \Phi_f < 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ . Для отсечки медленного компонента реакторного спектра нейтронов ( $E < 0.5 \text{ эВ}$ ) и для ослабления факторов, связанных с ядерным легированием

<sup>¶</sup> E-mail: ermolaev@bsu.by

тепловыми нейтронами, образцы облучались в кадмиевых пенах с толщиной стенок 0.5 мм. При облучении отношение флюенсов тепловых ( $\Phi_{th}$ ) и быстрых нейтронов было около 10. Такие значения толщины кадмиевого экрана и соотношение  $\Phi_{th}/\Phi_f$  довольно часто используются в экспериментах. После облучения образцы подвергались отжигу в течение 24 ч при температуре  $+450^\circ\text{C}$ . Измерялось удельное сопротивление образцов в интервале температур  $1.5 < T < 4.2\text{ K}$ .

### 3. Обсуждение экспериментальных результатов

Метод определения концентрации основной примеси путем исследования температурных зависимостей прыжковой проводимости состоит в следующем. С помощью линейной аппроксимации низкотемпературных участков температурной зависимости удельного сопротивления в аррениусовском масштабе с последующей экстраполяцией к  $1/T = 0$  находят величину удельного сопротивления  $\rho_3$ . В работах [5–10] при анализе величины удельного сопротивления, экстраполированного к  $1/T = 0$ , использовался механизм прыжковой проводимости с постоянной энергией активации  $\varepsilon_3$  (1). Затем по концентрационной зависимости  $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$  оценивают концентрацию основной примеси.

На рис. 1 представлены концентрационные зависимости  $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$  для германия, трансмутационно легированного тепловыми нейтронами. Использовались данные разных авторов за многие годы [5–8,10]. Ранее считалось [1,5], что в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами,  $K = 0.4$ . Эволюция ядерно-физических данных привела к значению степени компенсации в данном материале  $K = 0.3$ , что подтверждается экспериментальными данными, полученными в [11–14,2]. При сопоставлении данных разных авторов экспериментальные данные [5–7,10] были скорректированы по концентрации с учетом того, что  $K = 0.3$ .

При  $N_A \leq 1 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  экспериментальные данные можно аппроксимировать прямой с наклоном, который соответствует  $a_1 \approx 90\text{ \AA}$ . В рамках метода эффективной массы для германия, легированного галлием, также была определена величина  $a_1 \approx 90\text{ \AA}$  [4]. Заметим, что в данной области концентраций экспериментальные данные согласуются с теоретической зависимостью  $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$ , полученной в [9]. При  $1 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3} < N_A < 3 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  наблюдается отклонение от линейной зависимости, что может быть связано с режимом многоэлектронных перескоков (см., например, [15]). Область концентраций от  $N_A = 3 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  до перехода диэлектрик–металл и даже дальше детально измерялась в [5,8,10]. Нами показано, что в данной области концентраций экспериментальные данные [5,8,10] аппроксимируются прямой с наклоном, который соответствует  $a_2 \approx 57\text{ \AA}$ . Уменьшение бор-

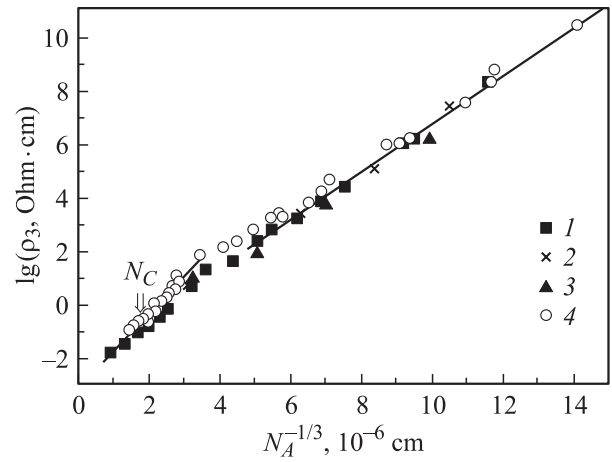
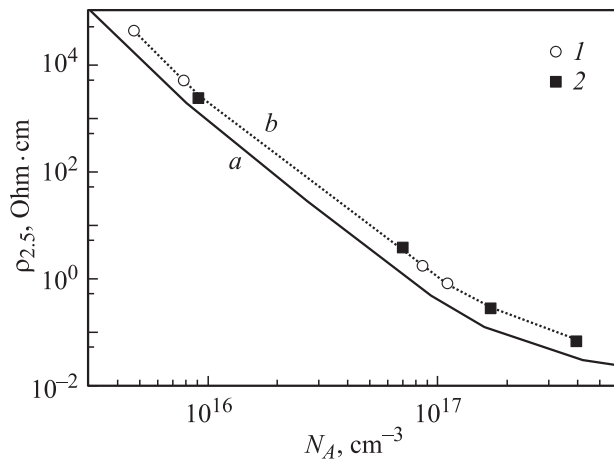


Рис. 1. Удельное сопротивление  $\rho_3$  как функция концентрации галлия  $N_A$ . 1 — экспериментальные данные из работ [5,10]; 2, 3, 4 — экспериментальные данные из работ [6,7,8] соответственно. Сплошные линии — линейная аппроксимация.

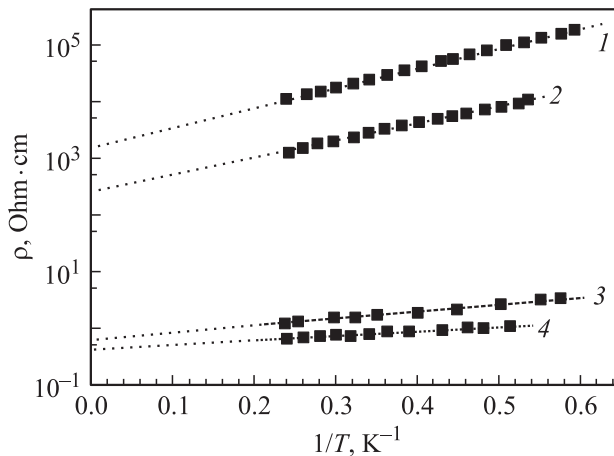
ского радиуса дырки в германии  $p$ -типа с увеличением концентрации примеси обсуждалось ранее [6,8,16] и связано с изменением асимптотики волновых функций при приближении к переходу диэлектрик–металл. Критическая концентрация перехода диэлектрик–металл для некомпенсированного германия, легированного галлием,  $N_C = 1 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$  [17]. Из критерия Мотта  $N_C^{1/3}a = 0.26 \pm 0.05$  [18] следует, что  $a = 56 \pm 11\text{ \AA}$ . Близкие значения боровского радиуса были найдены разными авторами. Значение  $a_2 = 57\text{ \AA}$ , найденное нами из прыжковой проводимости, хорошо согласуется с боровским радиусом, определенным из критерия Мотта. Близость боровского радиуса, найденного из измерений прыжковой проводимости в области промежуточных концентраций и из критерия Мотта, также отмечалась в [8].

Проанализировав экспериментальные результаты многих авторов, мы предлагаем для определения концентрации галлия в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами, использовать концентрационную зависимость  $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$ , которая состоит из двух линейных зависимостей, описывающихся формулой (2), где  $a_1 = 90\text{ \AA}$  в области концентраций  $N_A \leq 1 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  и  $a_2 = 57\text{ \AA}$  при  $N_A \geq 3 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  (вплоть до перехода диэлектрик–металл).

Оценить концентрацию галлия в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами, более простым способом можно по концентрационной зависимости удельного сопротивления при  $T = 2.5\text{ K}$   $\{\rho_{2.5} = f(N_A)\}$ . При  $T = 2.5\text{ K}$  проводимость имеет прыжковый характер, а, как известно, прыжковое сопротивление является чувствительной функцией концентрации основной примеси, по которой осуществляется прыжковая проводимость. Данный способ является менее трудоемким по сравнению с определением концентрации галлия по зависимости  $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$ ,



**Рис. 2.** Удельное сопротивление при  $T = 2.5$  К как функция концентрации галлия  $N_A$ .  $a$  — данные из работы [17];  $b$  — данные настоящей работы: 1 — наши данные, 2 — данные из работы [19].



**Рис. 3.** Температурные зависимости удельного сопротивления германия, трансмутационно легированного надкадмиевыми нейтронами. 1 —  $N_A = 4.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; 2 —  $N_A = 7.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; 3 —  $N_A = 8.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; 4 —  $N_A = 1.1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

так как не требуется измерять температурную зависимость удельного сопротивления в широком диапазоне. Для определения концентрации галлия по зависимости  $\rho_{2.5} = f(N_A)$  нужно измерить значение удельного сопротивления лишь при  $T = 2.5$  К. На рис. 2 (кривая  $a$ ) представлена зависимость  $\rho_{2.5} = f(N_A)$  для германия, трансмутационно легированного тепловыми нейтронами [17], в широком интервале концентраций (вплоть до перехода диэлектрик–металл и дальше). Кривая скорректирована по концентрации с учетом, что  $K = 0.3$ .

На практике часто необходимо определить концентрацию галлия в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами. В этом случае использовать зависимость  $\rho_{2.5} = f(N_A)$  для германия, трансмутационно легированного тепловыми нейтронами, нельзя. Следовательно, необходимо получить зави-

симость  $\rho_{2.5} = f(N_A)$  для германия, трансмутационно легированного надкадмиевыми нейтронами.

Температурные зависимости удельного сопротивления в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами, представлены на рис. 3, все образцы при  $T < 4.2$  К обладают прыжковой проводимостью. Исследование прыжковой проводимости в данном материале также проводилось в работах [19,20]. Образцы в наших экспериментах и в работе [19] облучались в сходных условиях. Концентрация галлия в исследуемых нами образцах определялась из найденных значений  $\rho_3$  с учетом боровских радиусов  $a_1 = 90 \text{ \AA}$  (для  $N_A \leq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) и  $a_2 = 57 \text{ \AA}$  (для  $N_A \geq 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) и зависимости (2).

На рис. 2 (кривая  $b$ ) дана зависимость  $\rho_{2.5} = f(N_A)$  для германия, трансмутационно легированного надкадмиевыми нейтронами. Для нахождения концентрации галлия в образцах из работы [19] анализировались данные прыжковой проводимости по вышеописанной методике.

Как видно из рис. 2, наблюдается качественное согласие между экспериментальными данными для германия, трансмутационно легированного тепловыми и надкадмиевыми нейтронами. Небольшое количественное различие связано с тем, что степень компенсации в германии, трансмутационно легированном надкадмиевыми нейтронами ( $K \approx 0.5$  [2]), превышает степень компенсации в германии, трансмутационно легированном тепловыми нейтронами. Согласно (1) удельное сопротивление зависит от  $\rho_3$  и  $\varepsilon_3$ . Значения  $\alpha(K)$  из формулы (2) для  $K = 0.3$  и  $K = 0.5$  соответственно равны 1.79 и 1.81 [4], что приводит к небольшому количественному различию в величине  $\rho_3$  при одинаковой концентрации примеси. Значения  $F(K)$  из формулы (3) для  $K = 0.3$  и  $K = 0.5$  соответственно равны 0.7 и 0.75 [4], следовательно,  $\varepsilon_3$  в германии, легированном надкадмиевыми нейтронами, больше, чем в германии, легированном тепловыми нейтронами, при одинаковой концентрации примеси. Значит, согласно (1) для германия, легированного надкадмиевыми нейтронами, кривая удельного сопротивления будет расположена выше по сравнению с германием, легированным тепловыми нейтронами, при одинаковой концентрации примеси. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными, представленными на рис. 2.

## 4. Заключение

Таким образом, определить концентрацию галлия в трансмутационно легированном нейтронами германии можно по найденному из температурных зависимостей прыжковой проводимости значению  $\rho_3$  с использованием концентрационной зависимости  $\rho_3 = f(N_A^{-1/3})$ , которая состоит из двух линейных зависимостей, описываемых формулой (2), где  $a_1 = 90 \text{ \AA}$  в области концентраций  $N_A \leq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $a_2 = 57 \text{ \AA}$  при  $N_A \geq 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (вплоть до перехода диэлектрик–металл). Более про-

стым способом оценить концентрацию галлия в германии, трансмутационно легированном нейтронами, можно по сопротивлению, измеренному в области температур, при которых проводимость осуществляется прыжковым механизмом, например, при  $T = 2.5$  К. Зависимости  $\rho_{2.5} = f(N_A)$  для германия, трансмутационно легированного тепловыми и надкадмиевыми нейтронами, позволяют оценить концентрацию галлия по измеренному значению удельного сопротивления при  $T = 2.5$  К.

## Список литературы

- [1] К. Ларк-Горовиц. В сб.: *Полупроводниковые материалы* (М., ИЛ, 1954) с. 62.
- [2] А.Г. Забродский, М.В. Алексеенко. ФТП, **28**, 168 (1994).
- [3] М.В. Алексеенко, А.Г. Забродский, Л.М. Штеренгас. ФТП, **32**, 811 (1998).
- [4] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979); ФТП, **14**, 825 (1980).
- [5] H. Fritzsche, M. Cuevas. Phys. Rev., **119**, 1238 (1960).
- [6] J.A. Ghrobczek, H. Fritzsche, C.L. Jiang. Phil. Mag. B, **44**, 685 (1981).
- [7] А.Р. Гаджиев, И.С. Шлимак. ФТП, **6**, 1582 (1972).
- [8] А.Г. Забродский, А.Г. Андреев, М.В. Алексеенко. ФТП, **26**, 431 (1992).
- [9] Н.А. Поклонский, С.Ю. Лопатин, А.Г. Забродский. ФТТ, **42**, 432 (2000).
- [10] Н. Мотт, У. Туз. УФН, **79**, 691 (1963).
- [11] А.Г. Забродский. Письма ЖЭТФ, **33**, 258 (1981).
- [12] А.Г. Беда, В.В. Вайнберг, Ф.М. Воробкало. ФТП, **15**, 1546 (1981).
- [13] Ю.А. Осипьян, В.М. Прокопенко, В.И. Тальянский. ЖЭТФ, **87**, 269 (1984).
- [14] М.В. Алексеенко, А.Г. Андреев, А.Г. Забродский. Письма ЖТФ, **13**, 1295 (1987).
- [15] M. Pollak, M.L. Knotek. Sol. St. Commun., **21**, 183 (1977).
- [16] Е.М. Гершензон, И.Н. Куриленко, Л.Б. Литвак-Горская. ФТП, **8**, 1186 (1974).
- [17] H. Fritzsche. *The Metal-Nonmetal Transition in Disordered Systems*, (ed. by L.R. Friedman, D.P. Tunstall, Scottish Univ. Summer School Publication, 1978) p. 193.
- [18] Н. Мотт, Э.Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, 1982).
- [19] М.Л. Кожух, Н.С. Липкина. ФТП, **21**, 284 (1987).
- [20] О.П. Ермолаев. ФТП, **28**, 2021 (1994).

Редактор Л.В. Беляков

## **Evaluation of gallium content in germanium, the latter being doped by neutrons in transmutation(al) way, while resistance measurements have been made within the hopping conduction range**

*O.P. Yermolaev, T.Yu. Mikulchik*

The Byelorussian State University,  
220050 Minsk, Belarus